

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.01.010

气压湿度对空气隙绝缘特性的影响研究

苏梦涵¹, 安韵竹¹, 赵文龙², 胡元潮¹, 李海涛¹, 黄涛³

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 中国人民解放军空军研究院, 北京 100000;
3. 国网江苏省电力工程咨询有限公司, 南京 210000)

摘要: 外界环境条件影响以空气为介质的电力设备外绝缘性能, 为了研究空气放电的物理特性, 文中基于 Boltzmann 方程研究空气中电子与分子碰撞的微观过程, 计算分析气压、湿度对空气隙绝缘性能的影响规律。结果表明, 温度为 300 K, 气压为 1.0 atm (1 atm=101 kPa) 时, 空气相对湿度的升高会改变电子能量分布函数和电子输运参数。相对湿度每升高 30%, 电子平均能量下降约 0.2 eV, 约化电子迁移率下降约 $0.25 \times 10^{23} (\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})^{-1}$, 约化电子扩散系数下降约 $0.2 \times 10^{24} (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$, 空气相对湿度从 0% 升高到 30%, 临界击穿场强升高 486 V/cm, 空气相对湿度从 30% 升高到 60%, 临界击穿场强升高 729 V/cm, 空气隙绝缘性能增强; 温度为 300 K, 相对湿度为 0% 时, 气压每升高 0.2 atm, 临界击穿场强升高约 6 kV/cm, 空气隙绝缘性能增强。

关键词: 湿度; 气压; 玻尔兹曼方程; 电子能量分布函数; 临界击穿场强

Study on Influence of Air Pressure and Humidity on Air Gap Insulation Characteristics

SU Menghan¹, AN Yunzhu¹, ZHAO Wenlong², HU Yuanchao¹, LI Haitao¹, HUANG Tao³

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China; 2. Air Force Research Institute of PLA, Beijing 100000, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The external environmental conditions affect the external insulation performance of power equipment with air as the medium. For studying the physical characteristics of air discharge, the microscopic process of electron-molecule collision in the air based on the Boltzmann equation is studied in this paper, and the influence of pressure and humidity on the air gap insulation performance is calculated and analyzed. The results show that in case of temperature at 300 K and pressure at 1.0 atm, the increase of relative humidity of air can change the electron energy distribution function and electron transport parameters. When the relative humidity increases 30% each time, the average electron energy decreases about 0.2 eV, the reduced electron mobility decreases about $0.25 \times 10^{23} (\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})^{-1}$, the reduced diffusion coefficient decreases about $0.2 \times 10^{24} (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. The relative humidity of air increases from 0% to 30%, the critical breakdown field strength increases 486 V/cm, the relative humidity of air increases from 30% to 60%, the critical breakdown field strength increases 729 V/cm, and the air gap insulation performance increases. While, in case of temperature at 300 K and relative humidity at 0%, when the air pressure increases 0.2 atm each time, the critical breakdown field strength increases about 6 kV/cm and the air gap insulation performance increases.

Key words: humidity; pressure; Boltzmann equation; electronic energy distribution function; critical breakdown field strength

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807113); 山东省自然科学基金(ZR2019QEE018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51807113), Shandong Provincial Natural Science Foundation of China(ZR2019QEE018).

0 引言

为满足长距离、大容量的供电需求,中国正在发展和建设特高压电网。特高压线路的电压等级高、跨度大,输电过程中不可避免的会出现电力损失、噪声污染和设备腐蚀等问题^[1-8]。目前已经建设完成以及正在规划的特高压线路中,很多线路穿越区域的地形条件、海拔高度、气象条件复杂多变,而这些特殊情况不可避免的要影响输电线路外绝缘特性。湿度和气压是影响空气放电过程最主要的环境因素^[9-15]。基于此,环境条件对空气隙绝缘性能的影响成为电力系统外绝缘领域重点关注的问题之一。

目前国内外大多数研究者仅致力于空气放电发展过程的研究^[16]。卞星明等学者采用棒—板电极建立相关模型,利用模拟电荷法以及计算表面光电子数目的方法计算了负直流电晕起始电压,分析了气压和湿度变化对负直流电晕物理特性的影响^[17];蔡新景等学者采用流体模型仿真了干燥空气以及含有不同含量水蒸气的空气中双向流注的传播过程,得到在外加电场相同时,湿度对流注传播特性影响不大的结论,但没有研究不同空气湿度对流注起始特性的影响^[18];刘有为等学者针对高海拔地区超高压输电线路设计的需要,详细分析了导线周围的电晕随空气密度和湿度改变所产生的不同变化,实验表明:湿度对导线起晕场强有明显的影响^[19];李克林搭建了相应放电腔体来模拟不同气候条件,详细分析了负直流电晕放电模式在不同湿度和压强条件下发生的变化,并结合仿真结果对其影响机理进行分析^[20];符瑜科运用其自行设计的可以调节湿度和压强的实验台,以换流阀内部电极为例研究了不同压强和不同空气湿度对电晕放电的影响规律^[21]。上述学者仅研究了气压和湿度对起晕场强或电晕放电过程的影响,并没有考虑气压和湿度对各类电子输运参数的影响。电子输运参数不仅是空气放电的等离子体流体力学模型计算的基础,也能反映空气间隙的绝缘性能^[22-23]。长期暴露在空气中的电力设备外绝缘会受气压和空气湿度的影响,而空气湿度和气压的变化会改变空气的电子输运参数,影响空气的绝缘性能,威胁电力设备外绝缘运行特性。因此,研究气压、湿度对空气隙中电子输运参数和绝缘性能的影响,对电力系统外绝缘运行具有重要意义。

文中从分子运动的微观角度出发,模拟不同气压、湿度下空气中电子与分子间的碰撞过程,采用

玻尔兹曼两项近似的方法求解不同气压湿度条件下空气的电子输运参数,并分析空气隙的绝缘性能。首先,计算分析不同约化电场下的空气电子输运参数,并将计算结果与Morrow^[24]、Nikonov^[25]两位学者的研究结果进行对比,验证文中模型的正确性;其次,对比分析不同气压、湿度下空气隙中电子能量分布函数、约化电子迁移率、扩散系数等参数及临界击穿场强的变化规律。

1 电子输运参数的计算方法

1.1 二项近似法展开

文中采用玻尔兹曼两项近似的方法计算电子能量分布函数(EEDF)。电子碰撞在空气放电过程中发挥主要作用,在对气体放电的流体动力学数值仿真中,电子碰撞截面数据的准确性是使用玻尔兹曼方程对各项输运参数准确求解的关键。为简化计算,文中只考虑4类碰撞截面,分别为弹性、电离、附着和激发^[26]。

在等离子体放电过程中,电子分布函数可由下列玻尔兹曼方程描述^[22]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f - \frac{e}{m} (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{f}) = C[f] \quad (1)$$

式(1)中: f 为电子在六维相空间的分布函数; e 为电子电荷量; $\mathbf{v}$ 为电子速度矢量; $\mathbf{E}$ 为场强, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; ∇ 为速度梯度算子; m 为电子质量; C 为碰撞项,表示分布函数的变化率。

由于直接求解玻尔兹曼方程非常困难,可以先将方程展开成球坐标形式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cos \theta \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{e}{m} E (\cos \theta \frac{\partial f}{\partial v} + \frac{\sin^2 \theta}{v} \frac{\partial f}{\partial \cos \theta}) = C[f] \quad (2)$$

基于空间电场均匀,当电场强度不高(一般指约化场强低于1 000 Td,1 Td=10⁻²¹ V·m³)时,弹性碰撞起主要作用,可使用两项近似的方法来求解边界元以降低复杂性,将 f 展开为

$$f(v, t, z, \cos \theta) \approx f_0(v, t, z) + f_1(v, t, z) \cos \theta \quad (3)$$

式(3)中: θ 为电子速度与电场方向的夹角; f_0 和 f_1 分别对应电子能量分布函数中的各自同性和各自异性部分。

将式(3)代入到式(2)中,并做勒让德多项式展开,其次对 θ 进行积分后得到以下两个方程:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{\gamma}{3} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \frac{\partial f_1}{\partial t} - \frac{\gamma}{3} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \varepsilon E f_1 = C_0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \gamma \varepsilon^{\frac{1}{2}} \frac{\partial f_0}{\partial t} - E \gamma \varepsilon^{\frac{1}{2}} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} = -N \sigma_m \gamma \varepsilon^{\frac{1}{2}} f_1 \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $\sigma_m = \sum_k x_k \sigma_k$; $\gamma = (2e/m)^{\frac{1}{2}}$; $\varepsilon = (v/\gamma)^2$;

C_0 为碰撞造成的 f_0 的变化量; σ_m 与 σ_k 分别为总的碰撞截面以及反应 k 的碰撞截面, m^2 ,其中,反应 k 代表任意碰撞反应。

用分离变量法将式(4)、(5)合并可得:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\frac{\varepsilon}{3\sigma_m} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \left(\frac{E}{N} \right)^2 + \varepsilon^2 \left(f_0 + \frac{k_b T}{e} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \right] = S \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{E}{N} \frac{1}{\sigma_m} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \quad (7)$$

$$\sigma_e = \sum_k 2 \frac{m}{M} \sigma_k \quad (8)$$

$$S = \sum_{k=i_n} C_k - \gamma \lambda \varepsilon^{\frac{1}{2}} f \quad (9)$$

式(6)–(9)中: N 为中性气体分子数密度, m^{-3} ; T 为温度,K; k_b 为玻尔兹曼常数; M 为粒子质量; σ_e 为总的弹性碰撞的有效横截面; $k=i_n$ 为所有的非弹性碰撞反应。

通过求解 f_0 和 f_1 就可以得到电子能量分布函数,为后续求解各类电子输运参数提供基础。

1.2 电子崩参数的求解

放电气体的电子能量分布函数由玻尔兹曼方程决定,根据EEDF可以对空气中的约化电离系数 α/N 、约化附着系数 η/N 、有效电离系数 $(\alpha-\eta)/N$ 等进行求解。其中约化电离系数和约化附着系数分别由式(10)、(11)得到^[27]:

$$\frac{\alpha}{N} = \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{1}{V} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} \varepsilon Q_i(\varepsilon) F_0(\varepsilon) d\varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\eta}{N} = \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{1}{V} \int_{\varepsilon_a}^{\infty} \varepsilon Q_a(\varepsilon) F_0(\varepsilon) d\varepsilon \quad (11)$$

式(10)、(11)中: F_0 为对 f 使用玻尔兹曼二项近似展开后的稳定的能量分布函数; V 为电子漂移速度; Q_i 和 ε_i 分别为电离反应的有效横截面及其临界能量,J; Q_a 和 ε_a 分别为附着反应的有效横截面及其临界能量,J; ε 为电子能量,J。

1.3 具体反应及截面数据

空气中的气体组分较为复杂,文中为简化计算,在不考虑水分子的情况下,将空气组分简化为80%的氮气和20%的氧气。其中,采用的反应及各反应的截面数据均来自于LAXCAT数据库。文中的计算条件为标准大气压强,背景温度为300 K,约化场强为50~300 Td(1 Td= 10^{-21} V·m²),采用的粒子间各种反应见表1。

表1 具体的电子碰撞反应

Table 1 Specific electron collision reactions

反应序号	具体反应	反应类型
1	$e + N_2 \Rightarrow e + N_2$	弹性
2–23	$e + N_2 \Rightarrow e + N_2$	激发
24	$e + N_2 \Rightarrow e + N + N$	激发
25	$e + N_2 \Rightarrow e + e + N_2^+$	电离
26–27	$e + O_2 \Rightarrow O_2^-$	附着
28	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	弹性
29–42	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	激发
43	$e + O_2 \Rightarrow e + e + O_2^+$	电离
44	$e + H_2O \Rightarrow H_2 + O$	附着
45	$e + H_2O \Rightarrow OH + H^-$	附着
46	$e + H_2O \Rightarrow e + H_2O$	弹性
47–50	$e + H_2O \Rightarrow e + H_2O$	激发
51	$e + H_2O \Rightarrow e + e + H_2O^+$	电离

2 不同条件下空气电子输运参数及绝缘性能分析

2.1 干燥空气的电子输运参数及绝缘性能

文中干燥空气特指压强为标准大气压强,相对湿度(相对湿度指湿空气中的水蒸气压力与相同温度下的水的饱和压力之比)为0%,温度为300 K,采用的碰撞反应为表1中的反应1–43。

2.1.1 电子能量分布函数

约化场强分别取50、100、150、200、250、300 Td,对应的电子能量分布见图1。

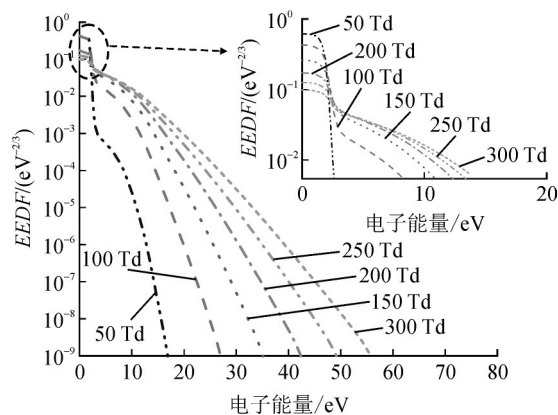


图1 干燥空气的EEDF分布

Fig. 1 EEDF distribution of dry air

如图1所示,在同一场强下,低能电子数目远高于高能电子数目,而随着约化场强的增加,低能电子数减少,高能电子数逐渐增加。其中,当电子能量为0~3 eV时,电子平均能量随约化场强的增大而减小,电子能量大于3 eV时,电子平均能量随约化场强的增大而增大。电场增加使得电子的运动速度提高,增大了电子的动能,电子更加容易与空

气中的分子发生碰撞电离,有利于电子崩的产生,从而使电子的能量增加。

2.1.2 输运参数的求解

根据式(10)、(11)计算得到的约化电离系数和约化附着系数见图2。如图2(a)所示,约化电场强度超过100 Td时,电离系数随着约化电场增大而指数增大,且文中所得结果与Morrow及Nikonov所得结果趋势相同,并与Nikonov结果基本接近。其中,电离系数变化的原因是高场强极大的增加了空气中的高能电子数量,电子与空气中分子的碰撞电离次数增加。如图2(b)所示,附着系数随约化场强的增加呈先变大后变小的趋势,在约化场强低于150 Td时,文中所得曲线介于Morrow及Nikonov所得曲线之间,且表现出很高的相似性。在约化场强低于200 Td时,附着系数随约化场强的增加而增加,这时的电场强度较低,电子的能量较小,较容易发生附着;而当约化场强高于200 Td时,附着系数随约化场强的增加而减小,因为高场强下的电子获得的能量更多,难以发生附着。

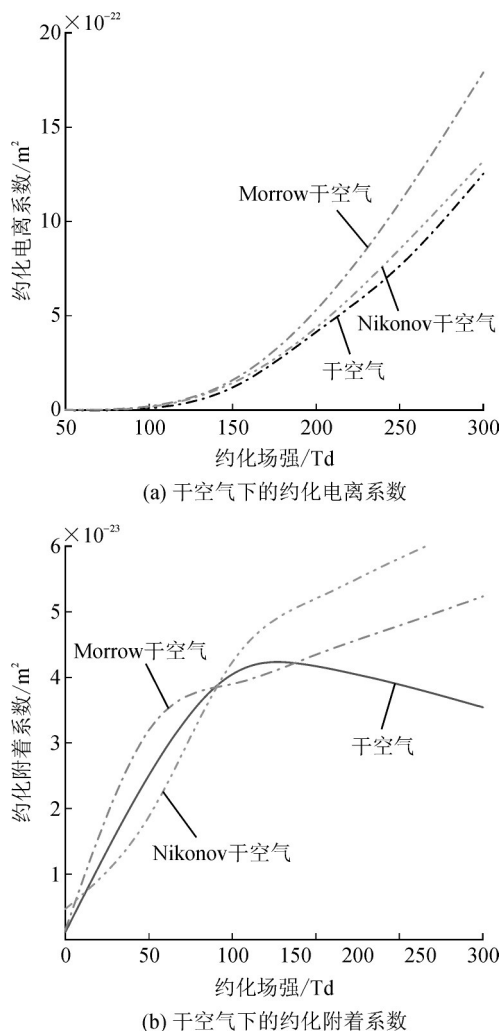


图2 电离系数与附着系数随约化场强的变化
Fig. 2 The variation of ionization coefficient and attachment coefficient with reduced field strength

2.2 湿度的影响

2.2.1 湿度对电子能量分布函数的影响

文中通过改变相对湿度来模拟空气湿度的变化。空气中相对湿度达到100%易形成凝露,故分别设置空气中相对湿度为0%、30%和60%,以约化场强为100 Td为例,3种不同相对湿度下的电子能量分布见图3。

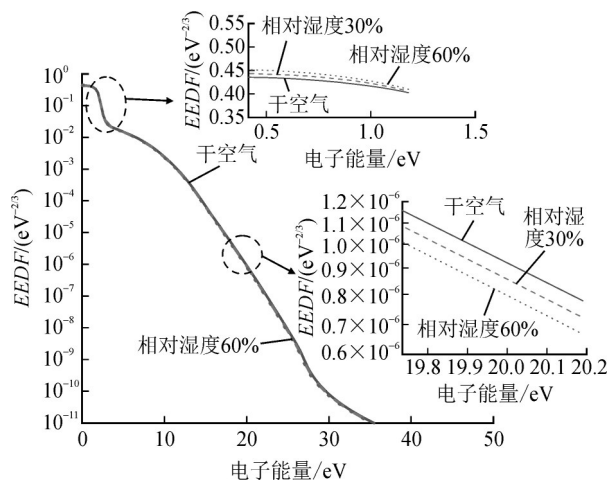


图3 约化电场为100 Td时的EEDF分布

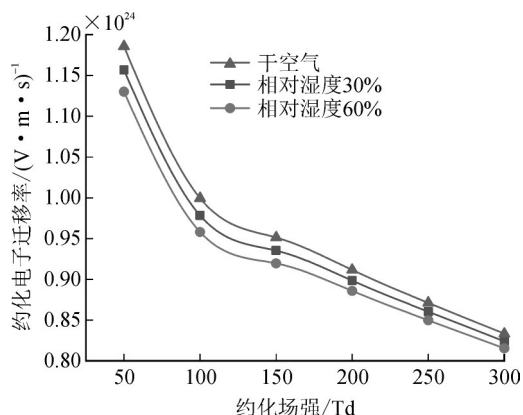
Fig. 3 The EEDF distribution with reduced electric field of 100 Td

如图3所示,3种相对湿度下的EEDF曲线的总体变化趋势相同,但存在细微差距。这说明空气湿度对电子能量分布函数影响较小。在电子能量值小于1.5 eV时,随相对湿度的增加,电子数目也随之增加,即低能电子比例随相对湿度的增加而增加,这是因为在低能区范围内,电子与 H_2O 的弹性和激发碰撞截面相对较大,导致低能区内湿空气比干燥空气的电子平均能量更高;与干燥空气相比,相对湿度为30%和60%下的电子能量分布曲线与横坐标轴的交点左移,相对湿度每升高30%,电子平均能量下降约0.2 eV,即高能电子比例随相对湿度的增加而减少,这主要是因为是在高能区范围内 N_2 和 O_2 碰撞的电离截面比 H_2O 的电离截面更大。其中,湿度对空气的电子能量分布函数影响较小的主要原因是 H_2O 与空气中的 N_2 和 O_2 相比含量太低(常规条件下空气组分中的 H_2O 占比低于0.03%),改变相对湿度之后的空气中的水分子含量变化也较小,所以空气隙中的 H_2O 对电子能量函数的分布影响相对不大,然而在一些水分子含量较高的地区或一些极端自然条件下,改变相对湿度之后水分子的含量变化也会相应变大,这时湿度对电子能量分布函数的影响会大大加强。

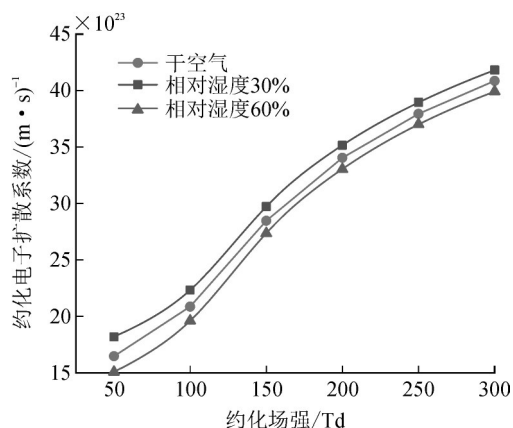
2.2.2 湿度对电子输运参数的影响

约化电子迁移率和约化电子扩散系数是分析

空气放电的重要参数,这两个参数可由电子能量分布函数得到。基于玻尔兹曼方程计算的不同相对湿度条件下的约化电子迁移率和约化电子扩散系数随约化场强的变化情况见图4。



(a) 约化电子迁移率变化情况



(b) 约化电子扩散系数变化情况

图4 不同湿度下电子输运参数随约化场强的变化

Fig. 4 The variation of electron transport parameters with reduced field strength under different humidity

如图4(a)所示,随约化场强升高,约化电子迁移率降低,且场强较低时的降低速度更快。这是因为电场增大导致电子动能增加,对电子的无规则运动起到一定的加速作用,电子的定向迁移被抑制,故约化电子迁移率降低;在同一约化电场强度下,随空气相对湿度的增加,约化电子迁移率降低,空气相对湿度每上升30%,约化电子迁移率约降低 $0.25 \times 10^{23} (\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})^{-1}$,即水分子的存在阻碍了电子迁移。湿度对约化电子扩散系数的影响规律与之类似。如图4(b)所示,电子扩散系数随约化场强增大而增大;在同一约化电场强度下,随空气相对湿度的增加,约化电子扩散系数降低,空气湿度每上升30%,约化电子扩散系数约下降 $0.2 \times 10^{24} (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$,即水分子同样削弱了电子的扩散。综上,空气湿度明显影响放电过程中的电子迁移和电子扩散。

2.2.3 湿度对有效电离系数的影响

在汤森放电理论中,电离系数定义为电子在电场方向上运动单位长度所发生的电离次数的平均值,用以表征空气中粒子与电子的碰撞电离能力;附着系数为电子在电场方向上运动单位长度所发生的附着次数的平均值,用以表征空气中的分子吸附电子的能力^[28]。在空气放电过程中,汤森电离系数反映的主要是电子与氮气分子、氧气分子和水分子之间的碰撞电离,汤森附着系数则反映的是电子与空气中各分子的附着作用,由于 N_2 的吸附系数很小,可近似等于0,所以此处的吸附反应主要考虑电子和 O_2 分子的吸附作用^[28]。

在考虑水分子作用时,电离系数及附着系数的计算要发生相应的修正,潮湿空气中的约化电离系数和附着系数可由式(12)、(13)计算得到^[16]。

$$\alpha = H \frac{P_w}{P} \alpha_s + \frac{P_d}{P} \alpha_d \quad (12)$$

$$\eta = H \frac{P_w}{P} \eta_s + \frac{P_d}{P} \eta_d \quad (13)$$

$$\frac{\alpha_s}{P} = 0.001 \left(\frac{E}{P} \right)^2 - 0.06 \left(\frac{E}{P} \right) + 1.0 \quad (14)$$

$$\frac{\alpha_d}{P} = 4.778 \, 6 e^{-211 P/E} \quad (15)$$

$$\frac{\eta_s}{P} = -3.67 \times 10^{-5} \left(\frac{E}{P} \right)^2 + 0.026 \left(\frac{E}{P} \right) - 0.273 \, 2 \quad E/P \leq 37.6 \, \text{V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr}) \quad (16)$$

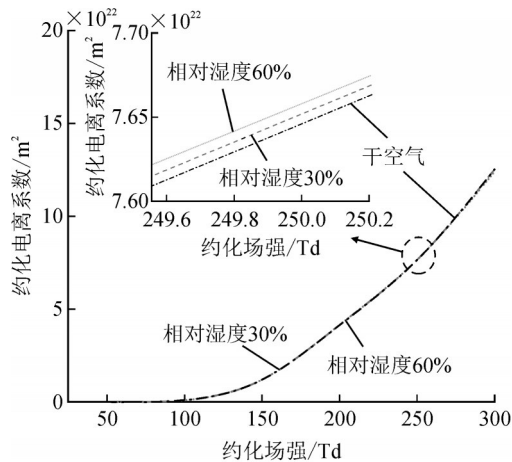
$$\frac{\eta_s}{P} = -2.5 \times 10^{-5} \left(\frac{E}{P} \right)^2 - 2.5 \times 10^{-4} \left(\frac{E}{P} \right) + 0.235 \quad E/P \geq 37.6 \, \text{V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr}) \quad (17)$$

$$\frac{\eta_d}{P} = 0.012 \, 98 - 0.54 \times 10^{-3} \left(\frac{E}{P} \right) + 0.87 \times 10^{-5} \left(\frac{E}{P} \right)^2 \quad (18)$$

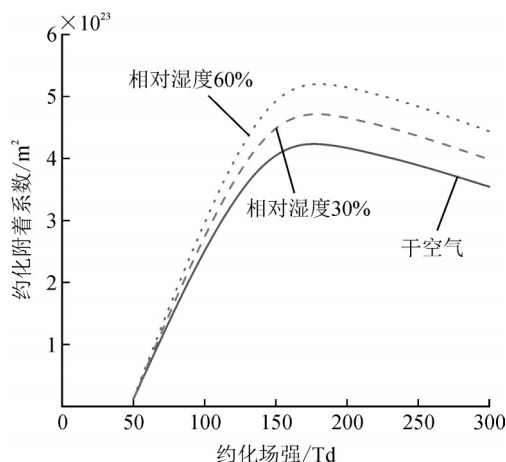
式(12)–(18)中: H 代表空气中的相对湿度; P_d 为干空气分压, P_w 为饱和水蒸气分压,Torr; α_s 和 η_s 分别为水蒸气的电离系数和附着系数; α_d 和 η_d 分别为干空气的电离系数和附着系数, m^2 ; E 为电场强度, V/cm 。

根据式(12)、(13)计算得到的不同湿度下的约化电离系数、约化附着系数与约化场强之间的关系见图5。改变空气相对湿度,空气中的水分子含量变化较小,且根据上述公式可知,约化电离系数和约化附着系数主要受电场强度影响,相对湿度对其影响相对较小。如图5(a)所示,电子与 N_2 、 O_2 的电离能远大于电子与 H_2O 的碰撞电离能,故电子与 H_2O 的碰撞更容易发生,随相对湿度增加,空气中的水分子密度相应提升,电子与空气中的水分子的碰撞电离次数增加,因此约化电离系数增大,但湿度对电

离作用的影响并不明显。如图 5(b)所示,在约化场强低于 200 Td 时,在 3 种相对湿度条件下,约化附着系数都随约化场强的增加而增加,这是因为此时电场强度较低,电子能量较小,水分子吸附电子形成负离子在总碰撞过程中发挥主导作用,而相对湿度的增加使空气中的水分子密度上升,则附着作用会更加明显,因此附着系数随湿度的增加而增加;而当约化场强高于 200 Td 时,约化附着系数随约化场强的增加而减小,高场强下的电子获得的能量更多,此时水分子电离能力增强,附着能力相对减弱,因此附着系数随湿度的增加而减少。由此可见,随相对湿度的增加,约化附着系数越来越高,且变化较为明显,这说明,水分子的存在主要影响电子的附着反应。



(a) 约化电离系数随约化场强的变化



(b) 约化附着系数随约化场强的变化

图 5 不同湿度下,约化电离系数与附着系数随约化场强的变化

Fig. 5 Under different humidity, the variation of reduced ionization coefficient and adhesion coefficient with reduced field strength

由于空气具有吸附效应,在碰撞电离过程中会减弱电离系数的作用,故引入有效电离系数。有效

电离系数为约化电离系数与约化附着系数的差值。不同空气相对湿度条件下,有效电离系数与约化场强的关系见图 6。由图 6 可知,随着约化场强的增加,有效电离系数先降低后增加;有效电离系数随相对湿度的增加而略有降低,在同一约化场强下,空气相对湿度每增长 30%,有效电离系数约降低 $4 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ 。

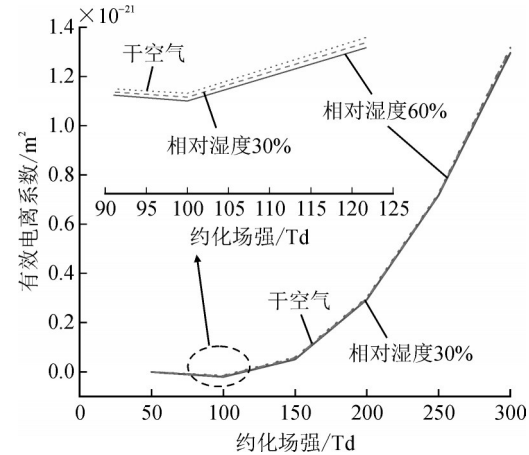


图 6 不同湿度下,有效电离系数随约化场强的变化

Fig. 6 Variation of effective ionization coefficient with reduced field strength under different humidity

空气隙气体放电的临界击穿场强定义为电离系数与附着系数相等时的约化场强。不同湿度下的临界击穿场强见表 2,随空气相对湿度增加,临界击穿场强随之增加。空气相对湿度从 0% 提升到 30% 时,临界击穿场强提升 1.6%;相对湿度从 30% 提升到 60% 时,临界击穿场强提升 2.4%。这是因为,随相对湿度的增加,电子附着速度增加,碰撞电离速度减小,空气中的水分子更容易捕获空气中的自由电子成为负离子,反过来抑制碰撞电离的发生,从而使得激发的电子数减少,阻碍电子崩的发展,使其难以达到放电条件,因而提高空气相对湿度会抑制气体放电的发展,使临界击穿场强升高,绝缘性能提高。

表 2 不同湿度下的临界击穿场强

Table 2 Critical breakdown field strength under different humidity

相对湿度/%	临界击穿场强/(V·cm ⁻¹)
0	29 889
30	30 375
60	31 104

2.3 气压的影响

随着大气压强的降低,空气密度随之降低,单位体积内的气体分子数目也相应减少,电子的平均自由行程得到提高。因此,电子可以从背景电场中

获得更多的能量,从而激发电离碰撞过程。研究发现^[29],改变压强对空气中的约化吸附系数影响较小,因此改变气压时,有效电离系数主要受电离反应影响。根据式(9)、(10)可见,随场强增大,电子平均能量提高,电离碰撞截面 Q_i 和附着碰撞截面 Q_a 加大,电离反应和附着反应加剧,但电离反应相对附着反应会更加剧烈,故约化场强增加时,有效电离系数相应增加,且大电场时增加得更快。干燥空气中的不同大气压强随有效电离系数的变化曲线见图7。在同一场强下,随气压从0.6 atm(1 atm=101 kPa)升高到1 atm,有效电离系数降低,其中,曲线与X轴的交点为不同压强下的临界击穿场强。临界击穿场强见表3,大气压强越高,临界击穿场强越高,气压从0.6 atm上升到0.8 atm,临界击穿场强提高5.98 kV/cm,增长率为33%;气压从0.8 atm上升到1.0 atm,临界击穿场强提高5.97 atm,增长率为25%。由图7可知,文中计算结果与文[30]计算结果表现出很高的相似性,且由表3可知,文中计算结果与文[22,31]计算结果误差不超过5%。

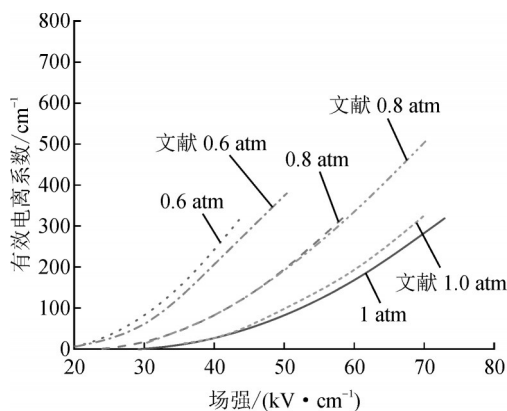


图7 不同气压下的有效电离系数

Fig. 7 Effective ionization coefficient under different pressures

表3 临界击穿场强

Table 3 Critical breakdown field strength

气压/ atm	临界击穿场强/ (kV·cm ⁻¹)			临界击穿场 强/(kV·cm ⁻¹)		
	文中计算 结果	文[22]计算 结果	误差/ %	文[31]计算 结果	误差/ %	
0.6	17.93	17.19	4	17.7	1	
0.8	23.91	22.92	4	23.6	1	
1.0	29.88	28.65	4	29.5	1	

3 结论

文中基于 Boltzmann 方程计算分析 50~300 Td 约化电场下空气介质中的电子能量分布函数及电

子输运参数,并根据不同的电子碰撞反应的碰撞截面数据得到了不同湿度和气压下的约化电离系数、约化附着系数以及有效电离系数等参数,分析了气压湿度对空气间隙绝缘性能的影响规律。文中为日后研究空气中等离子体流体力学模型提供了数据基础,并得到如下结论:

1)温度为300 K,气压为1.0 atm,相对湿度为0%条件下,电子能量分布主要受约化场强影响,随约化场强增加,低能电子所占比例减小,高能电子所占比例增加;约化电离系数随约化场强升高而增大,约化附着系数随约化场强的升高呈现先增大后减小的趋势。通过与已有结论对比,验证了文中计算方法以及计算结论的可靠性。

2)随空气相对湿度的增加,空气中水分子含量上升,电子吸附概率增加,使低能电子增多,高能电子减少,空气隙临界击穿场强升高,绝缘性能提高。仿真结果表明:温度为300 K、气压为1.0 atm条件下,相对湿度从0%上升到30%时,临界击穿场强提高1.6%;相对湿度从30%上升到60%时,临界击穿场强提高2.4%。

3)随气压降低,电子平均自由行程增加,电子更容易积累能量,从而增强自身的电离能力,使得空气隙临界击穿场强降低。仿真结果表明:温度为300 K、相对湿度为0%条件下,气压每上升0.2 atm,临界击穿场强上升6 kV/cm左右。

参考文献:

- [1] 马 钊,周孝信,尚宇伟,等.未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机学报,2015,35(6):1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005.
- [3] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
LIU Zhenya. Special album of research results of UHVDC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [4] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Research on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.
- [5] 邵建良,谭贝斯,贾 琳,等. 特高压电网无功电压控制策略迭代求解方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11):

- 126-132.
- GAO Jianliang, TAN Beisi, JIA Lin, et al. Research on iterative solution method of reactive power voltage-control strategy for UHV power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(11): 126-132.
- [6] 杨建明, 张庆武, 王杨正, 等. 特高压直流输电线路电压突变量保护优化[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(3): 102-109.
- YANG Jianming, ZHANG Qingwu, WANG Yangzheng, et al. Optimization of voltage differential protection for UHVDC transmission line[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(3): 102-109.
- [7] 万保权, 史兴华, 冯 华, 等. 平行架设的特高压交流输电线路电磁环境特性研究[J]. *浙江电力*, 2022, 41(1): 102-109.
- WAN Baoquan, SHI Xinghua, FENG Hua, et al. Study on electromagnetic environment characteristics of parallel UHV AC transmission lines[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(1): 102-109.
- [8] 伍 祥, 陈 旭, 张利花, 等. 同塔双回超高压输电线路功率损耗成因分析[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(4): 152-158.
- WU Xiang, CHEN Xu, ZHANG Lihua, et al. Negative power loss analysis of double-circuit EHV transmission lines on the same tower[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(4): 152-158.
- [9] PRASAD A N, CRAGGS J D. Measurement of ionization and attachment coefficients in humid air in uniform fields and the mechanism of breakdown[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1960(76): 223-232.
- [10] 周龙武, 燕 秀, 黎诗义, 等. 特高压线路脉动风风偏特性及抑制措施仿真[J]. *电瓷避雷器*, 2022(4): 194-200.
- ZHOU Longwu, YAN Xiu, LI Shiyi, et al. Simulation of fluctuating wind deflection characteristics and suppression measures for UHV transmission lines[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(4): 194-200.
- [11] 田闽哲, 张 龙, 罗辉勇, 等. 特高压直流输电线路雷击暂态响应监测技术研究[J]. *电瓷避雷器*, 2022(3): 93-98.
- TIAN Minzhe, ZHANG Long, LUO Huiyong, et al. Research on lightning transient response monitoring system of UHV DC transmission lines[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(3): 93-98.
- [12] 杨明浩, 安韵竹, 胡元潮, 等. 改进EGM模型对特高压输电线路的适用性与验证[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 93-100.
- YANG Minghao, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Applicability and verification of an improved EGM model for UHV transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 93-100.
- [13] 赵俊杰, 虞 驰, 任 华, 等. 1 000 kV 特高压输电线路特殊形式雷击故障案例分析[J]. *电瓷避雷器*, 2022(1): 107-112.
- ZHAO Junjie, YU Chi, REN Hua, et al. Analysis on specific lightning fault of 1 000 kV UHV transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(1): 107-112.
- [14] 徐 政, 张哲任, 徐文哲. LCC-MMC 串联混合型直流输电拓扑在大规模纯新能源发电基地送出中的应用研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2022, 43(3): 119-126.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, XU Wenzhe. Research on application of LCC-MMC series hybrid HVDC topology for large scale clean energy base integration[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2022, 43(3): 119-126.
- [15] 邢 超, 魏荣智, 奚鑫泽, 等. 基于GRU的特高压三端混合直流输电线路故障区域识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 98-109.
- XING Chao, WEI Rongzhi, XI Xinze, et al. Fault zone identification method for three-terminal hybrid UHVDC transmission lines based on GRU[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 98-109.
- [16] ABDEL - SALAM M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, IA-21(1): 35-40.
- [17] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压湿度对负直流电晕特性影响的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(4): 118-123.
- BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Effects of air pressure and humidity on the characteristics of negative DC corona[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(4): 118-123.
- [18] 蔡新景, 王凯奇, 王新新, 等. 不同湿度下空气的流注放电特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(2): 633-638.
- CAI Xinjing, WANG Kaiqi, WANG Xinxin, et al. Flow discharge characteristics of air under different humidity[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(2): 633-638.
- [19] 刘有为, 李继红, 李 斌. 空气密度和湿度对导线电晕特性的影响[J]. *电网技术*, 1990(4): 46-50.
- LIU Youwei, LI Jihong, LI Bin. Influence of air density and humidity on corona characteristics of conductor[J]. *Power System Technology*, 1990(4): 46-50.
- [20] 李克林. 湿度和气压对直流电晕放电模式转换的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- LI Kelin. Study on the influence of humidity and air pressure on the mode conversion of DC corona discharge [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [21] 符瑜科. 气压和湿度对复合电压下高压电极电晕特性影响实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- FU Yuke. Experimental study on influence of air pressure and humidity on corona characteristics of high voltage electrode under compound voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [22] 杜新宇, 陈小月, 李 威, 等. 基于 Boltzmann 方程的不同

- 海拔条件下大气绝缘性能研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 167-170.
- DU Xinyu, CHEN Xiaoyue, LI Wei, et al. Research of insulation performance in air at different altitudes based on Boltzmann equation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12): 167-170.
- [23] WEN Xishan, YUAN Xiaoqing, LAN Lei, et al. Study on the effective ionization rate of atmospheric corona discharge plasmas by considering humidity[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(12): 3386-3391.
- [24] MORROW R, LOWKE J J. Streamer propagation in air[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1997, 30(4): 614-627.
- [25] NIKONOV V, BARTNIKAS R, WERTHEIMER M R. Surface charge and photoionization effects in short air gaps undergoing discharges at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2001, 34(19): 2979-2986.
- [26] 赵 谔, 邓云坤, 钟蕊霜, 等. 基于 Boltzmann 方程的 CF_3I 混合气体协同效应分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1553-1558.
- ZHAO Su, DENG Yunkun, ZHONG Ruishuang, et al. Investigation on the synergistic effect of CF_3I gas mixtures using Boltzmann equation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1553-1558.
- [27] 姜仁卓, 何柏娜, 王乐淼, 等. 基于 Boltzmann 方程的 CF_3I 二元混合气本替代 SF_6 的可行性研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(9): 78-84.
- JIANG Renzhuo, HE Baina, WANG Lemiao, et al. Feasibility study of replacing SF_6 with CF_3I binary mixed gas based on Boltzmann equation[J]. Insulating Materials, 2019, 52(9): 78-84.
- [28] 陈小月. 电晕笼电晕放电脉冲微观物理特性及传播规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- CHEN Xiaoyue. Study on microcosmic physical properties and propagation law of corona discharge in corona cage[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [29] PRASAD A N. Measurement of ionization and attachment coefficients in dry air in uniform fields and the mechanism of breakdown[J]. Proceedings of the Physical Society, 1959, 74(1): 33-41.
- [30] 孟晓波, 卞星明, 赵雪松, 等. 环境因素对正直流架空导线起晕电压的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1916-1922.
- MENG Xiaobo, BIAN Xingming, ZHAO Xuesong, et al. Influence of environmental factors on positive DC corona inception voltage of overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1916-1922.
- [31] 蒋兴良, 林 锐, 胡 琴, 等. 直流正极性下绞线电晕起始特性及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 108-114.
- JIANG Xingliang, LIN Rui, HU Qin, et al. DC positive corona inception performances of stranded conductors and its affecting factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 108-114.
- 苏梦涵(1996—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为流注放电及气体绝缘介质击穿(E-mail: 1642818695@qq.com)。
- 安韵竹(1988—), 女, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为气体介质放电(E-mail: anyunzhu2006@163.com)。